

Anne-Kristin Schmitt<sup>1</sup>, Sabine Tischer<sup>2</sup>, Barbara Elste<sup>3</sup>, Bodo Hofmann<sup>1</sup>, Olaf Christen<sup>1</sup>

## Auswirkung der Energieholzproduktion auf physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften auf einer Schwarzerde im Mitteldeutschen Trockengebiet

Effect of energy forestry on physical, chemical and biological soil properties on a Chernozem in continental dry climate conditions in central Germany

189

### Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren hat das Interesse an nachwachsenden Rohstoffen zur Energiegewinnung stetig zugenommen. Dabei erlebt der Rohstoff Holz eine Renaissance als Energieträger. Mit der vorliegenden Studie sollen die Auswirkungen des Anbaus von Pappel (*Populus nigra* ssp.) und Weide (*Salix viminalis* ssp.) im Kurzumtrieb auf ökologisch relevante physikalische, chemische und biologische Bodenparameter einer Schwarzerde im Mitteldeutschen Trockengebiet mitgeteilt werden. Grundlage der Untersuchungen bildet ein Langzeitversuch, der im Jahr 2000 am Standort Bad Lauchstädt angelegt wurde. Als Vergleichsbasis dient eine repräsentative Ackerfläche. Bereits nach vier Versuchsjahren lassen die bodenphysikalischen Untersuchungen erste nutzungsbedingte Differenzierungen erkennen. Durch die unterlassene Bodenbearbeitung steigt bei den Dauerkulturen die Trockenrohdichte in der Oberkrume an, die Wasserleitfähigkeit nimmt dagegen ab. In Unterkrume und Krumenbasis treten meist nur geringe Differenzierungen zwischen den Varianten auf. Die Oberkrume weist unter Weide signifikant höhere organische und heißwasserlösliche Kohlenstoffgehalte auf. Im Vergleich

zur Ackernutzung sind bei der Pappel noch keine Veränderungen sichtbar. Mikrobielle Biomasse und Enzymaktivitäten ( $\beta$ -Glucosidase, Arginin-Ammonifikation) zeigen einen deutlich ausgeprägten Tiefengradienten und weisen in 0–5 cm Bodentiefe für die Gehölze signifikant erhöhte Werte auf. Auch bei den Lumbriciden werden bereits wesentliche Unterschiede deutlich. Pappel und Korbweide sind durch eine große Artenvielfalt und Individuendichte gekennzeichnet. Insgesamt belegt die Untersuchung eine günstige Beeinflussung wichtiger ökologisch relevanter Bodenparameter durch den Anbau schnellwachsender Hölzer am Standort Bad Lauchstädt.

**Stichwörter:** Weide, Pappel, Trockenrohdichte, organischer Kohlenstoff, mikrobieller Kohlenstoff, Lumbriciden

### Abstract

The last years have seen a growing interest in renewable resources for energy production. Especially the use of wood has increased considerably. Most studies, however, have only looked into agricultural or production aspects, thus we focus on ecologically relevant soil properties of

### Institut

Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Professur für Allgemeinen Pflanzenbau/Ökologischen Landbau, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg<sup>1</sup>

Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Professur für Bodenkunde und Bodenschutz, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg<sup>2</sup>

Agrochemisches Institut Piesteritz e.V., AN-Institut der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg<sup>3</sup>

### Kontaktanschrift

Anne-Kristin Schmitt und Prof. Dr. Olaf Christen, Professur für Allgemeinen Pflanzenbau/Ökologischen Landbau, Naturwissenschaftliche Fakultät III, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Betty-Heimann-Straße 5, 06120 Halle/Saale, E-Mail: anne-kristin.schmitt@landw.uni-halle.de

Dr. Sabine Tischer, Professur für Bodenbiologie und Bodenökologie, Naturwissenschaftliche Fakultät III, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Weideplan 14, 06108 Halle/Saale

Barbara Elste, Agrochemisches Institut Piesteritz e.V., AN-Institut der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Möllendorfer Str. 13, 06886 Lutherstadt Wittenberg

### Zur Veröffentlichung angenommen

Januar 2010

poplar (*Populus nigra* ssp.) or willow (*Salix viminalis* ssp.) in short rotation forestry on a Chernozem located in the continental dry climate of central Germany. The results are based upon measurements in a long-term field experiment, which commenced in 2000 at Bad Lauchstädt experimental station near Halle, comparing various energy crops. Reference for all measurements is always an adjacent arable crop rotation.

Even only after four years of short rotation forestry some soil physical parameters were affected. Without any tillage in the energy forestry the bulk density increased and the saturated hydraulic conductivity decreased. Those differences were limited to the uppermost layer of the topsoil. In deeper soil layers no differences were observed. Under willows the uppermost soil layers showed a significant increase in soil organic carbon and hot water carbon. In contrast, no differences in soil organic carbon were measured under poplar. Microbial biomass and various enzyme activities like  $\beta$ -Glucosidase, Arginin-Ammonifikation were significantly higher in the topsoil under energy forestry and also showed a steep gradient. Additionally the lumbricides did respond substantially to the different cropping systems. Under poplar and willow parameters like abundance, biomass and species diversity of lumbricides increased significantly.

In conclusions, our results demonstrate a positive effect of the fast growing tree species poplar and willow on a number of important soil quality parameters at the experimental site on a Chernozem in central Germany.

**Key words:** Willow, poplar, dry bulk density, organic carbon, microbial biomass, earthworms

## Einleitung

Die Nutzung von Bioenergie hat in den letzten Jahren vor dem Hintergrund weltweit wachsender Energienachfrage und der damit verbundenen Umweltprobleme erheblich an Bedeutung gewonnen. Dabei erlebt auch in Europa der Rohstoff Holz eine Renaissance. Der Anbau schnellwachsender Bäume kann einen Beitrag zur Deckung des wachsenden Energieholzbedarfs leisten (BOELCKE und KAHLE, 2008). Im Gegensatz zur forstwirtschaftlichen Produktionsweise mit längerfristigen Umtriebszeiten zur Erzeugung hochwertiger Schnittholzqualität, werden bei Kurzumtriebsplantagen schnellwachsende Baumarten mit hohen Pflanzdichten bevorzugt, die in Zeiträumen von 2–6 Jahren vollmechanisiert geerntet werden können (REEG et al., 2009). Dieser Anbauform werden in den gemäßigten Klimaregionen Mitteleuropas besonders Pappeln (Gattung *Populus* spp.) und Weiden (Gattung *Salix* spp.) gerecht (LIEBHARD, 2007). Die Anbausysteme zur Energieholzproduktion unterscheiden sich dabei grundsätzlich von den herkömmlichen Ackerbausystemen. Sie sind u.a. durch den Verzicht auf eine jährlich wiederkehrende Bodenbearbeitung gekennzeichnet. Hinsichtlich der Standort-

ansprüche der Baumarten (RÖHRICHT et al., 2002), der Düngung (BUNGART und HÜTTL, 2004), der Ertragsstruktur (DEBELL et al., 1996, LEDIN, 1996; HOFMANN-SCHIELLE et al., 1999; BOELCKE und KAHLE, 2008), dem Wasserhaushalt (HALL und ALLEN, 1997, PERRY et al., 2001) und der Ernte (BURGER, 2004) liegen zahlreiche Untersuchungen vor. Für eine Gesamtbeurteilung der Energieholzproduktion sind außer den anbautechnischen Aspekten auch dessen Einflüsse auf Boden, Wasser und Luft sowie die biologische Vielfalt zu berücksichtigen, weil der moderne Pflanzenbau neben einer hohen Produktivität den Prinzipien nachhaltiger Wirtschaftsweise entsprechen muss. Bisherige bodenökologische Untersuchungen konzentrieren sich auf die Auswirkungen des Anbaus von Energieholz im Kurzumtrieb auf ausgewählte physikalische (MAKESCHIN, 1994; LAUREYSSENS et al., 2004; KAHLE et al., 2007), chemische (MAKESCHIN, 1994; GRIGAL und BERGUSON, 1998; JUG et al., 1999; COLEMAN et al., 2004; KAHLE et al., 2007; SANCHEZ et al., 2007; DOWELL et al., 2009) und biologische Bodenparameter (BAUM und HYRNKIEWICZ, 2006) sowie auf die Diversität der Bodenfauna (MAKESCHIN, 1994). BAUM et al. (2009) fassen zudem den aktuellen Wissensstand zum Einfluss von Kurzumtrieb mit Weiden und Pappeln auf die Bodenökologie zusammen und beleuchten hierbei die Kohlenstoffsequestrierung, die Diversität der Bodenorganismen, das Feinwurzelsystem und die Phytoremediation. Es fehlen aber insbesondere Untersuchungen auf Standorten mit hoher natürlicher Ertragsfähigkeit, die alle wesentlichen physikalischen, chemischen und biologischen Indikatoren der Bodenqualität in ihrer Gesamtheit abdecken und zudem die spezifischen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren und ihrem Standortbezug berücksichtigen. In diesem Beitrag sollen erste Ergebnisse aus einem Langzeitversuch auf Schwarzerde im Mitteldeutschen Trockengebiet mitgeteilt werden.

## Material und Methoden

### Standort und Versuchsvarianten

Auf der Lehr- und Versuchsstation des Instituts für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Bad Lauchstädt (Randlage der Querfurter Platte) wurde im Jahr 2000 mit einem Langzeitversuch (Energiepark) zu nachwachsenden Rohstoffen begonnen. Die Bodenart am Versuchsstandort ist bis in eine Tiefe von ~55 cm stark toniger Schluff (Ut4, Körnung im Ap-Horizont 9–11% Sand, 19–21% Ton), (ALTERMANN et al., 2005). Der Bodentyp ist ein Normtschernosem (Haplic Chernozem). Aufgrund der geografischen Lage des Versuchsstandortes im Regenschatten des Harzes beträgt das langjährige Niederschlagsmittel (1896–1995) lediglich 484 mm. Die Durchschnittstemperatur beträgt 8,7°C.

Der Feldversuch besteht aus Varianten mit den zwei schnellwachsenden Baumarten Korbweide (*Salix viminalis* ssp.) und Pappel (*Populus nigra* ssp.), einem perennierenden Gras (*Miscanthus sinensis*) sowie einer Grünland-

(Weidelgrasgemisch) und Ackervariante als Referenzfläche (Fruchtfolge Winterraps-Wintertriticale-Wintergerste). In der vorliegenden Arbeit wurden nur die Varianten mit Weide, Pappel und Ackernutzung (Fruchtart Winterraps (*Brassica napus* L. var. *napus*)) untersucht. Pappeln und Weiden (Stecklinge) wurden mit einem Reihenabstand von 2 m sowie einem Pflanzabstand von 0,5 m angepflanzt (Bestandesdichte jeweils 10 000 Pflanzen/ha). Die Parzellengröße entspricht jeweils 40 × 36 m. Die Pflanzung auf der ehemaligen Ackerfläche erfolgte im Frühjahr 2000 nach einer Herbstfurche (Arbeitstiefe ~25 cm) und einer Pflanzbettherstellung durch Eggen. Nach der Pflanzung wurden auf den Dauerkulturen keine weiteren Bodenbearbeitungsmaßnahmen durchgeführt. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der konventionellen Ackernutzung jährlich eine Stoppelbearbeitung gefolgt von einer Pflugfurche mit 25 cm Arbeitstiefe sowie einer Saattbettbereitung und Aussaat mit einer Kreiseleggen-Drillkombination.

Die Düngung wurde in allen Varianten in 2 Stufen (Korbweide und Pappel 0 vs. 100 kg N ha<sup>-1</sup>; Winterraps 0 vs. 160 kg N ha<sup>-1</sup>) variiert. Die Versorgung mit Kalium und Phosphat wurde durch eine entsprechende Grunddüngung mit 60er Kali und Triple-Phosphat sichergestellt. Agrochemische Maßnahmen erfolgten in der Ackervariante in den einzelnen Jahren situationsbezogen. Auf den Pappel- und Weideparzellen wurde bis zur Probenahme im 2- und 4jährigen Turnus motormanuell und ohne jegliche Befahrung mit landwirtschaftlichen Maschinen geerntet. In der Weiterführung des Versuches wird die Ernte auch in einem 6-, 8- und 10jährigen Rhythmus durchgeführt.

#### Probenahme und Analyse

Die Probenahme erfolgte ausschließlich auf den ungedüngten Varianten. Für die Untersuchung der boden-

physikalischen Parameter wurden im Frühjahr 2004 aus 4 Tiefenstufen (0–6, 16–22, 24–30, 32–38 cm) Stechzylinderproben (250 cm<sup>3</sup>) in sechsfacher Wiederholung je Variante entnommen. Zur Bestimmung der bodenchemischen und -biologischen Parameter wurden die Tiefen 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40 cm mit einem Pürckhauer-Bohrstock ebenfalls im Frühjahr 2004 beprobt (3 Wiederholungen pro Variante). Dabei werden im Folgenden die Probenahmebereiche nach Tab. 1 eingeteilt.

An den gewonnenen Stechzylindern sowie an den gestört entnommenen Proben wurden im Labor die physikalischen, chemischen und biologischen Parameter unter Verwendung von standardisierten Methoden bestimmt (Tab. 2). Auf eine umfangreiche Beschreibung der einzelnen Verfahren wird daher verzichtet. Zusätzlich erfolgte ein Regenwurmfang durch eine kombinierte Handauslese des humosen Oberbodens mit anschließender Austreibung durch eine 0,2%ige Formaldehydlösung in 8-facher Wiederholung je Nutzungstyp auf einer Fläche von jeweils 0,125 m<sup>2</sup> (DIN ISO 11268-3). Die Ar-

**Tab. 1. Einteilung der Probenahmebereiche nach der Bodentiefe für die bodenbiologischen und bodenchemischen Untersuchungen**

*Classification of the sampling layer for the soil biological and chemical analyses*

Tiefe	Probenahmebereich
0–10 cm	Oberkrume
10–20 cm	Mittelkrume
20–30 cm	Unterkrume
30–40 cm	Krumenbasis

**Tab. 2. Physikalische, chemische und biologische Parameter zur Beschreibung der Bodenqualität des Versuchsstandortes Bad Lauchstädt**

*Physical, chemical and biological attributes used frequently for description the soil quality of test site Bad Lauchstädt*

Parameter	Methode
<b>Bodenphysikalische Parameter</b>	
Trockenrohddichte	DIN ISO 11272 (2001)
Gesättigte Wasserleitfähigkeit	DIN 19683-9 (1998)
<b>Bodenchemische Parameter</b>	
organischer Kohlenstoff (C <sub>org</sub> )	Differenz von Gesamt-C (C <sub>T</sub> ) (DIN ISO 10694 (1996)) und CO <sub>3</sub> -Gehalt
heißwasserlöslicher Kohlenstoff (C <sub>HWL</sub> )	DIN ISO 10694 (1996), VDLUFA-Methodenvorschrift
<b>Bodenbiologische Parameter</b>	
mikrobielle Biomasse (C <sub>mic</sub> )	DIN ISO 16072 (2002) ANDERSON UND DOMSCH (1978)
β-Glucosidaseaktivität (EC 3.2.1.2)	HOFFMANN UND DEDEKEN (1965)
Arginin-Ammonifikation (EC 3.4.-)	SCHINNER et al. (1993)
Lumbriciden	DIN ISO 11268-3

tenbestimmung erfolgte im Labor nach SIMS und GERARD (1985). Dabei wurden die adulten Lumbriciden (geschlechtsreif mit gut ausgebildeten Clitellum) bis zur Art bestimmt und die juvenilen Tiere aufgrund des nicht sichtbaren Clitellum nur bis zur Lebensform erfasst. Ermittelt wurden Abundanz, Biomasse und Artendiversität (Shannon-Index, SHANNON, 1948).

#### Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgt mit dem Statistikprogramm SAS (SAS, 1999) nach dem allgemeinen linearen Modell („GLM“-Prozedur). Folgende Signifikanzniveaus (Tuckey-Test) werden festgelegt:  $p > 0,05$  nicht signifikant,  $p < 0,05$  signifikant. Signifikante Unterschiede sind anhand der verschiedenen Kleinbuchstaben erkennbar. Sie lassen sich in den Wertetabellen der jeweiligen Untersuchungsparameter finden. Um Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Parametern feststellen zu können, findet die Regressionsanalyse Anwendung. Die statistische Prüfung des Bestimmtheitsmaßes ( $R^2$ ) erfolgte durch den F-Test, die der Regressionskoeffizienten mit dem t-Test ( $F_\alpha$ ,  $t_\alpha$ ).

#### Ergebnisse

##### Bodenphysikalische Parameter

Zur Charakterisierung des Bodengefügezustandes stehen verschiedene Parameter zur Verfügung. Es sollten jedoch mindestens ein Kriterium für den Verdichtungszustand und ein Leitfähigkeitsparameter genutzt werden (LEBERT et al., 2006). In Tab. 3 sind Trockenrohddichte und gesättigte Wasserleitfähigkeit aller untersuchten Bodentiefen der drei Varianten dargestellt. Bereits nach vier Versuchsjahren weisen die Baumarten im Vergleich zur Ackernutzung in 0–6 bzw. 16–22 cm Bodentiefe infolge des

mehrwährigen Lockerungsverzichts signifikant höhere Trockenrohddichten ( $+ 0,12 - 0,19 \text{ g cm}^{-3}$ ) auf. Dagegen unterscheiden sich die TRD-Werte in Unterkrume und Krumenbasis mit Ausnahme bei der Pappel (vorbelasteter Pflugsohlenbereich) nicht wesentlich.

Umgekehrt vermindert der Anbau von Weide und Pappel die Wasserleitfähigkeit in der Krume. Im krumen-nahen Unterboden treten dagegen verglichen mit der Ackernutzung keine größeren Abweichungen auf. In der Krumenbasis kann bei der Pappelnutzung ein Rückgang der gesättigten Wasserleitfähigkeit auf  $13 \text{ cm d}^{-1}$  beobachtet werden. Kritische  $k_f$ -Werte  $< 10 \text{ cm d}^{-1}$  treten nicht auf. Selbst bei diesen geringen  $k_f$ -Werten ist noch eine ausreichende Wasserableitung gewährleistet. Als problematisch sind die geringen gesättigten Wasserleitfähigkeiten unter Weide in 0–6 und 16–22 cm Bodentiefe und in 24–30 cm unter Pappel zu bewerten. Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen gesättigter Wasserleitfähigkeit und Trockenrohddichte ergeben eine negative Korrelation ( $R^2 = 0,39^*$ ;  $n = 20$ ;  $* p < 0,01$ ) für beide Prüfparameter. Eine eindeutige Zuordnung bestimmter  $k_f$ -Werte zur Trockenrohddichte fällt aber schwer, da die Werte aufgrund von Wurzelgängen und Wurmröhren stark variieren.

##### Bodenchemische Parameter

Die Abb. 1 veranschaulicht die gemessenen  $C_{\text{org}}$ -Gehalte der drei Versuchsvarianten. Nach vier Versuchsjahren treten unter der Korbweide im Vergleich zur Referenzfläche Acker signifikante Veränderungen im  $C_{\text{org}}$ -Gehalt auf. In 0–5 cm erhöhte sich unter Weide der organische Kohlenstoffgehalt um mehr als 10% auf 2,41%. Bei der Pappel blieben die  $C_{\text{org}}$ -Gehalte in gleicher Tiefe nach der relativ kurzen Versuchsdauer noch unverändert. Differenzierungen zwischen Ackernutzung und dem Anbau der Energiehölzer sind auch in der Mittel- und Unter-

**Tab. 3. Trockenrohddichte und gesättigte Wasserleitfähigkeit nach Aufforstung mit Pappeln und Weiden im Vergleich zur Ackerfläche**

*Soil bulk densities and saturated hydraulic conductivity after afforestation with poplars and willows compared to arable land*

Parameter und Bodentiefe [cm]	Acker	Pappel	Korbweide
Trockenrohddichte [ $\text{g cm}^{-3}$ ]			
0–6	1,22 b	1,39 a	1,40 a
16–22	1,26 b	1,38 ab	1,45 a
24–30	1,35 b	1,52 a	1,38 b
32–38	1,35 ab	1,40 a	1,32 b
Gesättigte Wasserleitfähigkeit [ $\text{cm d}^{-1}$ ]			
0–6	52 a	17 a	2 b
16–22	154 a	53 ab	3 b
24–30	76 a	2 b	10 b
32–38	12 a	13 a	22 a

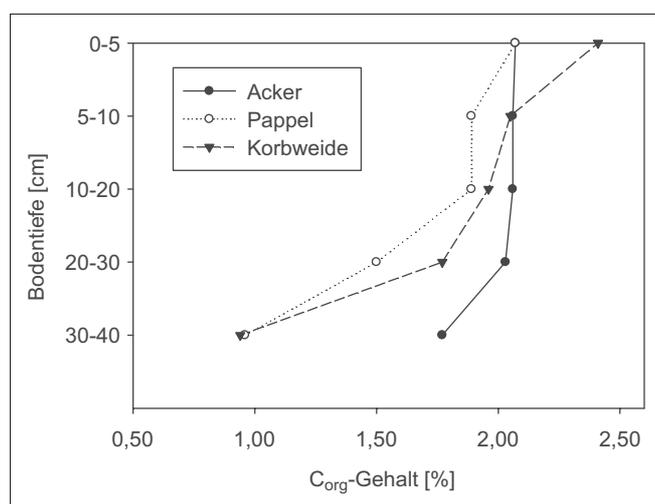
Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen statistisch gesicherte Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen den verschiedenen Varianten innerhalb einer Tiefenstufe

krume erkennbar. So liegen die Werte für den organischen Kohlenstoffgehalt  $\sim 0,20$  bis  $0,50\%$  unter der Ackernutzung. Bei den Energiehölzern bildet sich somit ein deutlicher Tiefengradient heraus, während unter Ackernutzung eine weitgehend homogene Verteilung vorliegt.

Die absoluten Mengen des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs ( $C_{\text{hwl}}$ ) der untersuchten Böden verhalten sich ähnlich wie die Gesamtgehalte an organischem Kohlenstoff. Die Regressionsanalyse bestätigt zudem eine enge Beziehung zwischen dem heißwasserlöslichen Kohlenstoff und der mikrobiellen Biomasse ( $R^2 = 0,81^{***}$ ;  $n = 25$ ,  $*** p < 0,0001$ ). Der Anteil leicht abbaubarer Verbindungen an der organischen Bodensubstanz verhält sich in der Oberkrume in der Reihenfolge: Ackernutzung < Pappel < Weide (Abb. 2). Mit zunehmender Bodentiefe sinken die heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalte unter allen Nutzungsvarianten. Insbesondere die Korbweide weist dabei einen deutlich ausgeprägten Tiefengradienten auf.

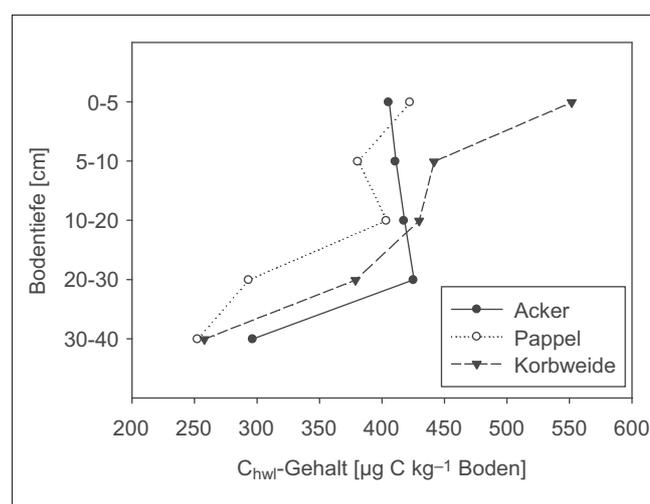
#### Bodenbiologische Parameter

Statistisch gesicherte Unterschiede zwischen der Ackernutzung und der schnellwachsenden Baumart Weide liegen für die mikrobielle Biomasse vor (Tab. 4). Die Weide ist dabei durch eine fast doppelt so hohe Menge an mikrobieller Biomasse in der Oberkrume gekennzeichnet. Für die mikrobielle Biomasse unter Pappel konnten im Vergleich mit den anderen Nutzungsarten keine statistisch gesicherten Unterschiede gemessen werden. Es bestehen aber deutliche Tendenzen, die auf eine Verbesserung der mikrobiellen Aktivität im Boden hindeuten. Die Messung des mikrobiellen Biomasse-C ergibt für die Gehölze wieder eine deutliche Differenzierung zwischen Ober- und Unterkrume. In 0–5 cm Bodentiefe ist die mikrobielle Biomasse für Korbweide und Pappel erhöht und nimmt mit der Tiefe kontinuierlich ab. Die vertikale Verteilung der mikrobiellen Biomasse folgt damit der Verteilung des organischen Kohlenstoffs. Die Untersuchungsergebnisse belegen weiterhin eine geringe positive Beziehung zwischen dem  $C_{\text{org}}$ -Gehalt und der mikro-



**Abb. 1.** Organischer Kohlenstoffgehalt unter Acker, Pappel und Weide in Bad Lauchstädt

*Soil organic carbon under arable land, poplar and willow in the Bad Lauchstädt experiment.*



**Abb. 2.** Einfluss der Baumarten auf den heißwasserlöslichen Kohlenstoff nach vier Versuchsjahren

*Effects of tree species on changes of hot water carbon of the soil after four years.*

**Tab. 4.** Einfluss der Baumarten auf den Gehalt an mikrobieller Biomasse vier Jahre nach Aufforstung

*Effects of tree species on changes of microbial biomass of the soil four years after afforestation*

Parameter und Bodentiefe [cm]	Acker	Pappel	Korbweide
Mikrobielle Biomasse [ $\mu\text{g C g}^{-1}$ TS]			
0–5	172,6 b (a)	230,3 ab (a)	294,3 a (a)
5–10	199,5 b (a)	137,9 b (a)	169,6 b (b)
10–20	183,2 a (a)	117,2 a (b)	159,9 a (b)
20–30	184,3 a (a)	116,8 a (b)	120,5 a (b)
30–40	106,1 a (a)	149,2 a (ab)	81,7 a (b)

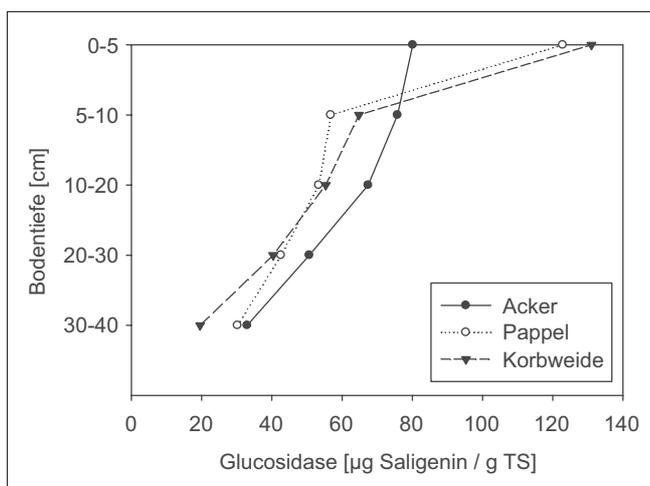
Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistisch gesicherte Unterschiede innerhalb der Tiefenstufen (ohne Klammern) und zwischen den Tiefenstufen (mit Klammern)

biellen Biomasse ( $R^2 = 0,44^{**}$ ;  $n = 25$ ;  $** p < 0,001$ ). Außerdem lässt sich der  $C_{mic}$ -Gehalt aus den Gehalten der Enzyme  $\beta$ -Glucosidase und Arginin-Ammonifikation durch eine logarithmische Gleichung mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,84$  (Glucosidase) und  $R^2 = 0,75$  (Arginin) beschreiben.

Die Ackernutzung ist im gesamten Krumbereich durch mittlere  $\beta$ -Glucosidaseaktivitäten und Arginin-gehalte gekennzeichnet. Bei den schnellwachsenden Baumarten bildet sich bei beiden Bodenzymen bereits nach wenigen Jahren ein deutlich ausgeprägter Tiefengradient heraus (Abb. 3 und 4). Die Arginin-Ammonifikation erhöht sich in der Oberkrume im Vergleich zur Ackernutzung unter Pappel und Weide um 42% bzw. 73%. Ist die Oberkrume bei Korbweide und Pappel noch durch sehr hohe Enzymaktivitäten geprägt, zeigen sich in den tieferen Bodenschichten nur noch mittlere  $\beta$ -Glucosidase- und niedrige Arginingehalte. Mit zunehmender Bodentiefe nähern sich die Gehalte der Ackernutzung an.

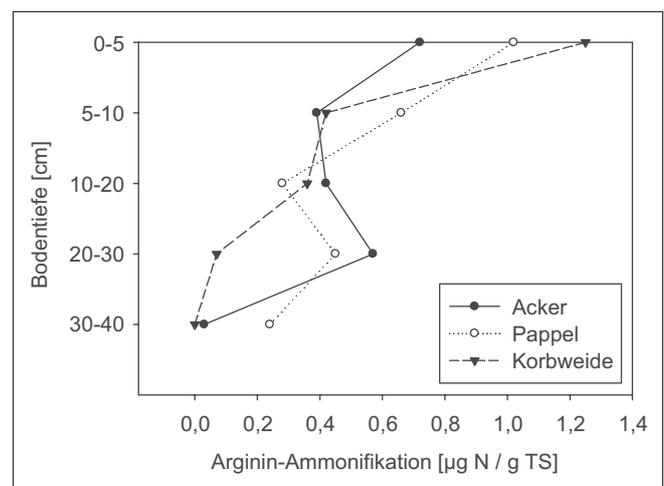
Im Energiepark treten insgesamt sechs für Mitteleuropa typische Regenwurmarten auf (Tab. 5). Jede Variante besitzt dabei eine spezifische Regenwurmfauna. Das Artenspektrum setzt sich in den Korbweide- und Pappelparzellen aus fünf verschiedenen Lumbricidenarten zusammen. Die Ackernutzung weist mit zwei Regenwurmarten die wenigsten Arten auf. Innerhalb der anözi-schen Lebensform hat *Lumbricus terrestris* (Linnaeus 1758) die größte Bedeutung, da er unter allen Varianten zu finden ist. *Octolasion cyaneum* (Savigny 1826) kommt als endogäische Lebensform ebenfalls unter allen Standorten vor. Die weit verbreitete endogäische Art *Aporrectodea rosea* (Savigny 1826) fehlt in den Proben des Ackerstandortes. *Lumbricus castaneus* (Savigny 1826), ein typischer Vertreter der Forststandorte mit epigäischer Lebensweise, tritt nur unter der Pappelnutzung auf. Somit ergeben sich unterschiedliche Abundanzanteile

der einzelnen Regenwurmarten unter Acker und den Gehölzen (Abb. 5). Die Anzahl der Regenwürmer eignet sich zur Beurteilung der Populationsdynamik, z.B. der Reproduktionsrate. Die Biomasse der Regenwürmer spiegelt die effektive, agrarökologisch relevante Wirkung der Lumbriciden auf den Boden wider. Es zeigen sich eindeutige Unterschiede beim Vergleich der Regenwurmabundanzen und -biomassen für Acker, Korbweide und Pappel. Die in Tab. 6 zusammengefassten populationsbiologischen Größen charakterisieren die Regenwurm-besiedlung. Es ist ersichtlich, dass die Pappelnutzung mit 241 Individuen pro  $m^2$  die höchste Besiedlungsdichte aufweist, gefolgt von der Weide mit 160 Individuen pro  $m^2$ . Die Ackernutzung zeigt die geringste Regenwurmabundanz ( $26 \text{ Ind. } m^{-2}$ ). Die Biomassen der Lumbriciden unter den Gehölzen verhalten sich jedoch nicht synchron ihrer Abundanzwerte. Die höchste Biomasse konnte mit  $126 \text{ g } m^{-2}$  unter der Baumart Weide ermittelt werden. Ebenfalls hohe Werte lassen sich bei der Pappelnutzung feststellen ( $108 \text{ g } m^{-2}$ ). Besonders auffallend sind die hohen durchschnittlichen Individuengewichte von *L. terrestris* mit  $5,11 \text{ g}$  ( $n = 18$  adulte Lumbriciden) unter der Korbweide. Dort konnte auch das größte Einzelwurm-gewicht von  $7,49 \text{ g}$  festgestellt werden. Die gute Nahrungsgrundlage ist dafür verantwortlich, dass auch unter Pappel ( $3,99 \text{ g}$  durchschnittliches Individuengewicht;  $n = 13$  adulte Lumbriciden) und Acker ( $3,13 \text{ g}$ ;  $n = 2$  adulte Lumbriciden) hohe durchschnittliche Individuengewichte von *L. terrestris* auftreten. Auf allen Varianten finden sich mehr juvenile als adulte Tiere. Da juvenile anözische und epigäische Regenwürmer zum Teil nicht voneinander unterschieden werden können, werden sie der Gruppe der *L.*- (*Lumbricus*) juvenilen zugeordnet. *Aporrectodea*- und *Octolasion*- Juvenile gehören der endogäischen Lebensweise an. Für Acker und Pappel ist der Anteil juveniler Regenwürmer fünfmal höher als der



**Abb. 3.** Einfluss der Baumarten Pappel und Weide auf die  $\beta$ -Glucosidaseaktivität im Boden nach vier Versuchsjahren im Vergleich zur Ackernutzung

*Effects of tree species poplar and willow of  $\beta$ -Glucosidase-activity of the soil after four experimental years compared to arable land.*



**Abb. 4.** Arginin-Ammonifikation bei unterschiedlicher Nutzung und Bodentiefe

*Arginin-Ammonifikation of the type of use in different soil depths.*

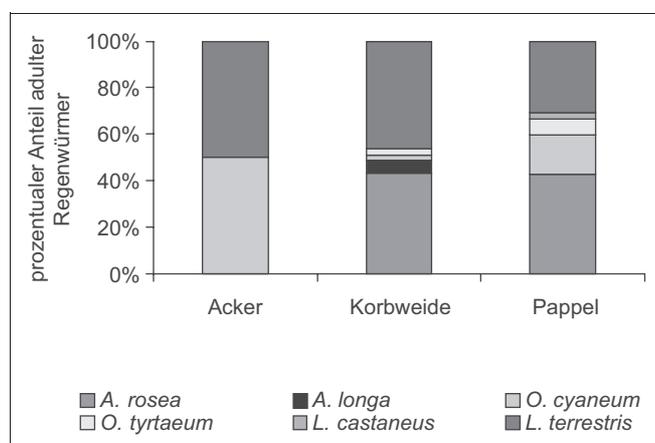
**Tab. 5. Charakterisierung der Regenwurmpopulation (Lebensformen, Arten, Abundanz (Individuen m<sup>-2</sup>), Biomasse (g m<sup>-2</sup>)) unter Acker, Weide und Pappel in Abhängigkeit von pH- und C<sub>org</sub>-Werten vier Jahre nach Aufforstung**

Characterization of the earthworm population (life forms, species, abundance (individual m<sup>-2</sup>) and biomass (g fresh weight m<sup>-2</sup>) under arable land, willow and poplar according to soil pH-values, and C<sub>org</sub>-contents four years after afforestation

	Acker	Pappel	Korbweide
pH-Wert (0–40 cm)	5,7	6,1	5,9
C <sub>org</sub> (0–40 cm)	2,00	1,66	1,83
Artenzahl	2	5	5

Lebensform	Art	Abundanz [Ind m <sup>-2</sup> ]	Biomasse [g m <sup>-2</sup> ]	Abundanz [Ind m <sup>-2</sup> ]	Biomasse [g m <sup>-2</sup> ]	Abundanz [Ind m <sup>-2</sup> ]	Biomasse [g m <sup>-2</sup> ]
Epigäisch	<i>L. castaneus</i>			1	0,2		
Endogäisch	<i>A. rosea</i>			18	5,76	17	4,42
	<i>O. cyaneum</i>	2	2,66	7	11,34	1	1,93
	<i>O. lacteum</i>			3	4,05	1	1,87
Anözisch	<i>L. terrestris</i>	2	6,26	13	51,87	18	91,98
	<i>A. longa</i>					2	2,96
	Gesamt	4	8,92	42	73,22	39	103,16
	<i>L. juvenile</i>	13	4,85	101	27,68	54	19,15
	<i>A./O. juvenile</i>	9	2,26	98	7,65	67	4,16
	Gesamt	26	16,03	241	108,55	160	126,47

**Abb. 5. Individuendominanz der Lumbriciden unter Acker, Weide und Pappel**

Percentage frequency distribution of the lumbricids under arable land, willow and poplar.

Anteil der adulten Tiere. Die Korbweide zeigt dreimal mehr juvenile als adulte Lumbriciden. Dabei gilt folgende Reihenfolge: Pappel (199 Ind. m<sup>-2</sup>) > Weide (121 Ind. m<sup>-2</sup>) > Ackerland (22 Ind. m<sup>-2</sup>).

Das Vorkommen der Regenwürmer ist neben dem Anbausystem von Bodenfeuchte (B), C<sub>org</sub>-Gehalt (H) und pH-Wert (P) abhängig. Nach einer Matrix von TISCHER (2008) werden die drei ökologischen Parameter neben den Populationskennwerten zur Bewertung des Lumbricidenvorkommens an einem Standort herangezogen.

**Tab. 6. Matrix zur Bewertung des Lumbricidenvorkommens anhand ökologischer Parameter nach folgender Einteilung: Bodenfeuchte: B0 – trockener Standort, B1 – mittlere Bodenfeuchte, B2 – hohe Bodenfeuchte**

pH-Wert: P0 – < 3.5–4.5, P1 – 4.6–6.5, P2 – > 6.5

C<sub>org</sub>-Wert (%): H0 – < 1.0–2.3, H1 – 2.4–4.0, H2 – > 4.0 (TISCHER, 2008)

Matrix of ecological requirements of common earthworm species with respect to humidity, pH and C<sub>org</sub>. The range values are following:

Soil humidity: B0 – dry habitat, B1 – medium humidity, B2 – high humidity

pH-value: P0 – < 3.5–4.5, P1 – 4.6–6.5, P2 – > 6.5

C<sub>org</sub>-content (%): H0 – < 1.0–2.3, H1 – 2.4–4.0, H2 – > 4.0 (TISCHER, 2008)

Vorgefundene Art	Standortansprüche		
	Bodenfeuchte	pH-Wert	C <sub>org</sub>
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	B0, B1	P1, P2	H0, H1, H2
<i>Aporrectodea rosea</i>	B0, B1	P1, P2	H0, H1, H2
<i>Aporrectodea longa</i>	B0, B1	P1, P2	H0, H1, H2
<i>Lumbricus castaneus</i>	B1, B2	P1	H1, H2
<i>Lumbricus terrestris</i>	B0, B1	P1, P2	H0, H1, H2
<i>Octolasion cyaneum</i>	B0, B1	P1, P2	H0, H1, H2

Anhand des Bewertungsschemas können auch die im Energiepark gefundenen Lumbriciden den ökologischen Standortparametern zugeordnet werden. Der Schwarzerde Standort Bad Lauchstädt ist grundsätzlich als Trockenstandort einzustufen (KÖRSCHENS und PFEFFERKORN, 1998; Symbol B0). Die pH-Werte der untersuchten Varianten schwanken zwischen 5,5 und 7,4 (TISCHER et al., 2006; Symbol P1, P2). Die  $C_{org}$ -Gehalte liegen im Energiepark in einem Bereich von 0,94 bis 2,41% (Symbol H0, H1). Die Tab. 6 zeigt die Standortansprüche der im Energiepark vorgefundenen Regenwürmer nach TISCHER (2008). Es fällt auf, dass alle vorgefundenen Arten aufgrund ihrer Ansprüche am Standort zu erwarten waren, ausgenommen die tiefgrabende Art *L. castaneus*. Sie kommt auf der Pappelvariante vor und profitiert als Art der humusreicheren und feuchteren Standorte von deren Anbau.

## Diskussion

Die Aufforstung ehemals landwirtschaftlich genutzter Böden mit schnellwachsenden Gehölzen im Kurzumtrieb lässt, bedingt durch das Ausbleiben der Bodenbearbeitung in Verbindung mit der auf der Bodenoberfläche verbleibenden Streu eine weitgehende Umstellung physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse im Boden erwarten.

### Bodenphysikalische Parameter

Bereits vier Jahre nach dem Wechsel der Bodennutzung ändern sich die physikalischen Bodeneigenschaften unter den Energiehölzern insbesondere in der Oberkrume. So lassen sich signifikant höhere Trockenrohdichten für Weide und Pappel belegen. Nach PETELKAU (1987) liegt der obere Grenzwert für die optimale Lagerungsdichte am Standort Bad Lauchstädt bei  $\sim 1,40 \text{ g cm}^{-3}$ . Diese Werte werden jedoch nur von der Pappel in 24–30 cm Tiefe deutlich überschritten. Vermutlich liegt hier eine ältere nicht regenerierte Pflugsohle vor. In den anderen Bodenschichten kann die höhere Dichte durch Erhöhung der Porenanteile zwischen 0,2 und 50  $\mu\text{m}$  (= nutzbare Feldkapazität) sogar zu einem größeren Wasserspeichervermögen führen. Die Dichtlagerung unter den Bäumen begründet sich durch das Eigengewicht des Bodens, den Einfluss von Niederschlagswasser (SCHAAF, 1998) und mechanische Belastungen bei der Bewirtschaftung (RÜCKNAGEL und CHRISTEN, 2009). Insgesamt stellt sich so ein Kräftegleichgewicht zwischen den Belastungen und der Eigenstabilität des Bodens ein. Über ähnliche Entwicklungen im zeitlichen Verlauf unter Pappeln berichtet MAKESCHIN (1994). Die Dichtlagerung unter Pappel und Weide im Energiepark wurde durch die unterlassene Bodenbearbeitung im Gegensatz zum Ackerland nicht wieder aufgelockert. Einer Kompaktierung kann prinzipiell auch durch die Anreicherung von organischer Bodensubstanz entgegen gewirkt werden (ULRICH, 2008). COLEMAN et al. (2004) und KAHLE et al. (2007) begründen die geringeren Dichten in der Krume unter Energiehölzern im Gegensatz zur Ackerlandnutzung vor allem durch die Anreicherung mit organischer Substanz. Es ist aber

auch bekannt, dass mechanische Belastung, z.B. beim Befahren mit landwirtschaftlichen Maschinen, die positiven Effekte der organischen Substanz nivellieren können (EDEN et al., 2009). Die relativ große Dichtedifferenz zwischen den Energiehölzern und dem Ackerland begründet sich auch aus dem Anbau von Winterraps als Referenzfruchtart. Fruchtarten mit Pfahlwurzelsystem sowie längerer Bodenruhe und Beschattungsintensität, wie Winterraps wird in Grenzen eine gefügestabilisierende bzw. -regenerative Wirkung zugeschrieben (PAUL, 2002).

In der Krumenbasis unterscheiden sich die Trockenrohdichten mit Ausnahme bei Pappel nicht wesentlich. Insbesondere unter Korbweide besteht eine Tendenz zur Auflockerung. Dies zeigt sich auch an den Werten für die gesättigte Wasserleitfähigkeit. Hierfür scheint die Grab- und Wühltätigkeit der Bodentiere von entscheidender Bedeutung zu sein. Die bis zu drei Meter tiefgrabende Lumbricidenart *Lumbricus terrestris*, die unter den Dauerkulturen Weide und Pappel vermehrt gefunden wurde, legt ein stabiles und kontinuierliches Porensystem im Boden an und verändert dadurch das Bodengefüge (JOSCHKO und BRUNOTTE, 2005). Die vorgefundenen Wurzel- und Regenwurmgänge fördern die Durchlässigkeit des Bodens für Wasser. In der Regel überwiegt die vertikale Wasserleitfähigkeit entsprechend der Richtungsorientierung der Wurm- und Wurzelröhren. Demgegenüber sind die äußerst geringen kf-Werte in der Krume bei den Weiden ein Hinweis auf das Vorliegen einer schädlichen Bodenverdichtung. In dem isotropen, durch Lockerung geprägten Gefüge der Ackervariante wird die Wasserleitfähigkeit stark durch die Räume zwischen den Aggregaten geprägt und steht in engerem Zusammenhang mit dem absoluten Anteil an Grobporen (SCHMITT et al., 2006).

### Bodenchemische und bodenbiologische Parameter

Es ist weitgehend wissenschaftlicher Konsens, dass die organische Bodensubstanz aufgrund ihrer ökologischen Funktionen, insbesondere der Beeinflussung fast aller umwelt- und ertragsrelevanten Bodenparameter und -prozesse zu den bedeutendsten Indikatoren für Bodenqualität und Nachhaltigkeit zählt (MONREAL et al., 1997; REEVES, 1997; LIEBIG und DORAN, 1999). Die organische Bodensubstanz ist daher ein maßgebender bodenchemischer Parameter bei Langzeituntersuchungen und ein bedeutender Index für Bodenveränderungen. Im Gegensatz dazu erlauben bodenmikrobiologische Untersuchungen frühzeitige Prognosen über die Entwicklung der Humusdynamik nach einer Nutzungsänderung. Der mikrobielle Biomassegehalt sowie die leicht umsetzbaren organischen Verbindungen, die in Form des heißwasserextrahierbaren Kohlenstoffs bestimmt werden (ROGASIK et al., 2005), gelten dabei als besonders sensitive Indikatoren für Änderungen im Humuspool, da Zu- und Abnahmen weitaus schneller eintreten als beim gesamten organischen Kohlenstoff (POWLSON et al., 1987; KANDELER et al., 1995; SPARLING, 1997; TEBBE et al., 2002). Eine Bewirtschaftungsumstellung kann aber auch zu Veränderungen im Boden führen, die mit Verschiebungen im Artenspektrum der Mikroorganismen einhergehen. Durch die

Messung mikrobieller Stoffwechsellleistungen in Form von Bodenenzymen können bereits nach kurzer Versuchsdauer Veränderungen zuverlässig erfasst werden. Die Enzyme des Kohlenstoffkreislaufes ( $\beta$ -Glucosidase) und des Stickstoffkreislaufes (Arginin-Ammonifikation) eignen sich besonders gut für die Beurteilung veränderter Umweltbedingungen (TISCHER, 2000).

Die vorgestellten Untersuchungen belegen signifikant erhöhte  $C_{org}$ -Gehalte in 0–5 cm Bodentiefe für Weide im Vergleich zur Ackernutzung. Bei der Pappel sind in der Oberkrume noch keine Veränderungen im  $C_{org}$ -Gehalt messbar. Eine Begründung für die Differenzierung zwischen den Baumarten findet sich möglicherweise in der Streuzusammensetzung und der Abbaurate. So fanden STETTER und MAKESCHIN (1999) größere Abbauraten unter Schwarzpappeln als unter Weiden.

Unter Berücksichtigung der gemessenen Trockenrohddichte ergeben sich für die Tiefe von 0–10 cm nach 4 Versuchsjahren Gesamtgehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff für Weide und Pappel von 31,2 t ha<sup>-1</sup> bzw. 27,5 t ha<sup>-1</sup>. Somit kann gegenüber der Ackernutzung (25,3 t ha<sup>-1</sup>) ein theoretischer  $C_{org}$ -Gewinn von 5,9 (Weide) bzw. 2,2 t ha<sup>-1</sup> (Pappel) nach 4 Versuchsjahren errechnet werden. Bei einem Blattanfall von 1–3 t ha<sup>-1</sup> (MAKESCHIN, 1994) bzw. einer mittleren jährlichen  $C_{org}$ -Anlieferung von 0,9 t ha<sup>-1</sup> (VERWIJST und MAKESCHIN, 1996, zitiert in KAHLE und BOELCKE, 2004) sowie einer angenommenen Abbaurate von 60–70% (SAUERBECK, 1992) kann mit einem  $C_{org}$ -Gewinn von 1,1 bis 1,4 t ha<sup>-1</sup> gerechnet werden. Die gemessenen Werte übersteigen die berechneten Werte somit deutlich. Ursache dafür könnte ein erheblich höherer Anfall an Streu im vorliegenden Versuch sein. Die Streumengen wurden jedoch nicht ermittelt. Zudem bleiben bei der Kalkulation die Mengen an Feinwurzeln und die Streuqualität unberücksichtigt. So kann der Streuabbau durch erhöhte C/N-Verhältnisse in der Blattstreu verzögert werden (KAHLE et al., 2007).

Die anfallende Streumenge reicht zur Erklärung der  $C_{org}$ -Anreicherung im Oberboden allein jedoch nicht aus, denn mit dem Anbau von Ackerkulturen wie Winterraps können ebenfalls 1 t TM ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> Ernte- und Wurzelrückstände sowie 8 t TM ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> Stroh auf dem Feld verbleiben (HEYLAND, 1996). Ein wesentlicher Grund für vorgefundene  $C_{org}$ -Anreicherung im oberen Krumbereich dürfte in der unterlassenen Bodenbearbeitung unter Kurzumtriebsplantagen liegen. Hier ergibt sich eine Analogie mit unterschiedlichen Bodenbearbeitungssystemen. In Direktsaat- oder Minimalbodenbearbeitungsversuchen wird regelmäßig über höhere  $C_{org}$ -Gehalte in der Oberkrume gegenüber konventioneller Pflugbearbeitung berichtet (RASMUSSEN, 1999) und auch eine C-Akkumulation bei reduzierter Bearbeitungsintensität ist standort- und klimaabhängig möglich (HOFMANN et al., 2009).

In den unteren Krumbereichen ergaben sich für Pappel und Weide im Vergleich zur Ackernutzung niedrigere Werte im  $C_{org}$ -Gehalt. Über das gesamte Tiefenprofil (0–40 cm) führt der Anbau der Energiehölzer damit nicht zur Akkumulation sondern gegenteilig zur Verringerung der  $C_{org}$ -Vorräte. Unter Berücksichtigung der

gemessenen Trockenrohddichte ergeben sich Gesamtgehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff von 96,7 t ha<sup>-1</sup> bei Pappel, 89,8 t ha<sup>-1</sup> bei Weide und 102,6 t ha<sup>-1</sup> bei Ackernutzung. Einen ausgeprägten Tiefengradient beim  $C_{org}$ -Gehalt mit Anreicherungen in der Oberkrume und im Vergleich zur Ackernutzung äquivalenten  $C_{org}$ -Gehalten in der Unterkrume fanden auch MAKESCHIN (1994), COLEMAN et al. (2004) und KAHLE et al. (2007).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen im Energiepark Bad Lauchstädt finden die genannten Autoren aber eine Gesamtzunahme über das Tiefenprofil. Auf Schwarzerden, mit ihrem hohen ökologischen Pufferungsvermögen, werden Änderungen des  $C_{org}$ -Gehaltes oft erst nach 10 Jahren und mehr erwartet (KÖRSCHENS und SCHULZ, 1999). Auch in Minimalbodenbearbeitungsversuchen von HOFMANN et al. (2009) dauerte die Einstellung eines Gleichgewichtszustandes in der unteren, nicht mehr bearbeiteten Ackerkrume 20 bis 25 Jahre. Dementsprechend konnte sich in der kurzen Versuchsdauer unter den Bäumen, insbesondere der Pappel, noch kein endgültiges und auf die veränderte Nutzungsrichtung abgestimmtes Gleichgewicht im Humushaushalt einstellen. Es bleibt also offen, ob sich langfristig durch weitere  $C_{org}$ -Anreicherung in der Oberkrume eine Akkumulationswirkung einstellt.

Weitaus deutlichere Veränderungen konnten beim Anbau der schnellwachsenden Gehölze durch eine signifikante Zunahme der  $C_{hwl}$ -,  $C_{mic}$ -,  $\beta$ -Glucosidase- und Arginin-Gehalte im Oberboden im Vergleich zur Ackernutzung festgestellt werden. Dies unterstreicht, dass die bodenmikrobiologischen Parameter sensitiv auf kurzfristige Veränderungen im Boden reagieren. Es stellte sich bei allen bodenchemischen und bodenbiologischen Parametern ein deutlich ausgeprägter Tiefengradient ein. Unter Pappel und Weide konnte ab 10 cm Bodentiefe ein Rückgang der biologischen Aktivität beobachtet werden. EKENLER und TABATABAI (2003) untersuchten die Veränderung der mikrobiellen Biomasse und  $\beta$ -Glucosidaseaktivitäten auf verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen („no till“ und „chisel plow“). Dabei waren die mikrobielle Biomasse und die Glucosidaseaktivität in 0–5 cm signifikant höher als in 0–15 cm Bodentiefe. Auch DUTZLER-FRANZ (1977) untersuchte eine Vielzahl von Böden auf Enzymaktivitäten und stellte fest, dass nur in den obersten 30 cm nennenswerte Enzymgehalte vorliegen. Bedingt durch die schlechteren Luftverhältnisse und durch Mangel an Nahrung in der Unterkrume können die bodenbiologischen Prozesse reduziert werden (SCHINNER und SONNLEITNER, 1996; GISI et al., 1997).

Lumbriciden haben eine große Bedeutung für bodenbildende Prozesse. Sie werden oft als Bioindikatoren zur Beschreibung des biologischen Bodenzustandes herangezogen (TISCHER, 2005), da sie sich verhältnismäßig leicht fangen lassen, hohe Biomassen besitzen und ein überschaubares Artenspektrum aufweisen. Die Bestimmung von Besiedlungsdichte, Individuendominanz, Biomasse pro Individuum und die charakteristische Zusammensetzung des Artenspektrums von Lumbriciden geben Hinweise zur biologischen Aktivität eines Standortes. Der Vergleich mit der Ackerfläche zeigt für Pappel und Weide

bereits nach wenigen Versuchsjahren ein deutlich verändertes Artenspektrum. Aus der vormals arten- und individuenarmen Ackernutzung konnte sich schon in kurzer Zeit unter den Gehölzen eine an die Standortverhältnisse und die Nutzung angepasste Lumbricidenzönose entwickeln. Nach EHRMANN (1995) ist eine Zunahme der Regenwurmpopulation nach Nutzungsumstellung auch wahrscheinlich, da ungünstige Lebensbedingungen (Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz) für die Lumbriciden mit Beginn des Anbaus schnellwachsender Gehölze entfallen. So konnte auch MAKESCHIN (1994) drei Jahre nach der Aufforstung mit Weiden und Pappeln im Vergleich zur Ackernutzung erhöhte Regenwurmbundanzen und -biomassen nachweisen. Zwischen den schnellwachsenden Baumarten Weide und Pappel konnten auch Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der Lumbriciden und deren Biomasse festgestellt werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kam MAKESCHIN (1994). Dabei wurden signifikante Unterschiede zwischen den beiden schnellwachsenden Baumarten festgestellt. Begründet werden die höheren Individuenzahlen unter Weiden mit einer verbesserten Wasserführung und -verfügbarkeit, die durch eine geringere Interzeption von Niederschlägen bei der Baumart Weide zustande kommt.

### Schlussfolgerungen

Der Anbau von Energieholz im Kurzumtrieb führt auch auf dem Schwarzerde-Standort Bad Lauchstädt, mit seinem hohen natürlichen Ertrags- und ökologischen Pufferpotential bereits nach kurzer Versuchsdauer zu Veränderungen physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften im Boden. Infolge des mehrjährigen Lockerungsverzichts wird das Bodengefüge in der Krume unter Pappel und Weide kompakter (Zunahme der Trockenrohddichte und Abnahme der gesättigten Wasserleitfähigkeit). In der Unterkrume und Krumbasis treten meist nur geringe Differenzierungen zwischen den Varianten auf. Die schnellwachsenden Baumarten begünstigen die Kohlenstoffakkumulation in der Oberkrume. Im Vergleich zur Ackernutzung folgen die  $C_{org}$ -Gehalte aber einem stärkeren Tiefengradient und liegen in der Unterkrume unter den Werten der Ackernutzung. Damit ergeben sich unter den Baumarten sogar insgesamt niedrigere Gesamtkohlenstoffgehalte. Die Einstellung stabiler Gleichgewichtssysteme auf der Schwarzerde ist jedoch ein langfristiger Prozess, so dass keine endgültige Aussage möglich ist. Mikrobielle Biomasse und Enzymaktivitäten ( $\beta$ -Glucosidase, Arginin-Ammonifikation) zeigen dagegen bereits einen deutlich ausgeprägten Tiefengradienten und signifikant erhöhte Werte für die Gehölze. Die mehrjährige Bodenruhe fördert in Verbindung mit der Streu das Lumbricidenvorkommen bei den Dauerkulturen.

Insgesamt belegt die vorliegende und umfassende Analyse wichtiger ökologisch relevanter Bodenparameter eine günstige Beeinflussung der Bodenqualität durch den Anbau schnellwachsender Hölzer gegenüber konventionellen Ackerbausystemen am Standort Bad Lauchstädt.

Weiterführende Untersuchungen sollten Auskunft über die nutzungsbedingten Langzeitveränderungen geben.

### Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung dankt die Erstautorin der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

### Literatur

- ANDERSON, T.H., K.-H. DOMSCH, 1978: A physiological method for measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* **10**, 215-221.
- ALTERMANN, M., J. RINKLEBE, I. MERBACH, M. KÖRSCHENS, U. LANGER, B. HOFMANN, 2005: Chernozem – Soil of the year 2005. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **168**, 725-740.
- BAUM, Ch., K. HYRNKIEWICZ, 2006: Clonal and seasonal shifts in communities of saprotrophic microfungi and soil enzyme activities in the mycorrhizosphere of *Salix* spp.. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* **169**, 481-487.
- BAUM, Ch., P. LEINWEBER, M. WEIH, N. LAMERSDORF, I. DIMITRIOU, 2009: Effects of short rotation coppice with willow and poplar on soil ecology. *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research* **59** (3), 183-196.
- BOELCKE, B., P. KAHLE, 2008: Energieholzproduktion mit Weiden und Pappeln – Ertragsbildung und Grundnährstoffbedarf. *Pflanzenbauwissenschaften* **12** (2), 78-85.
- BUNGART, R., R.F. HÜTTL, 2004: Growth dynamics and biomass accumulation of 8-year-old hybrid poplar clones in a short-rotation plantation on a clayey-sandy mining substrate with respect to plant nutrition and water budget. *Europ. Journal of Forest Res.* **123** (2), 105-115.
- BURGER, F., 2004: Technologie und Ökonomie des Anbaus und der Ernte von Feldholz. In: *Energieholzproduktion in der Landwirtschaft – Potenzial, Anbau, Technologie, Ökonomie und Ökologie*. Bornimer Agrartechn. Ber. **35**, 61-73.
- COLEMAN, M.D., J.G. ISEBRAND, D.N. TOLSTED, V.R. TOLBERT, 2004: Comparing soil carbon of short rotation poplar plantations with agricultural crops and woodlots in North Central United States. *Environmental Management* **33** (1), 299-308.
- DEBELL, D.S., G.W. CLENDENEN, C.A. HARRINGTON, C. ZASADA, 1996: tree growth and stand development in short-rotation populus plantings – 7 year results for two clones at three spacings. *Biomass and Bioenergy* **11** (4), 253-269.
- DIN 19683-9, 1998: Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau – physikalische Laboruntersuchungen Teil 9. Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben.
- DIN ISO 10694, 1996: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung.
- DIN ISO 11268-3: Bodenbeschaffenheit – Wirkung von Schadstoffen auf Regenwürmer – Teil 3. Anleitung für die Bestimmung von Wirkungen unter Freilandbedingungen.
- DIN ISO 11272, 2001: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohddichte.
- DIN ISO 16072, 2002: Bodenbeschaffenheit – Laborverfahren zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung.
- DOWELL, R.C., D. GIBBINS, J.L. RHOADS, S.G. PALLARDY, 2009: Biomass production physiology and soil carbon dynamics in short-rotation-grown *Populus deltoides* and *P. deltoides* x *P. nigra* hybrids. *Forest Ecology and Management* **257**, 134-142.
- DUTZLER-FRANZ, G., 1977: Der Einfluss einiger chemischer und physikalischer Bodenmerkmale auf die Enzymaktivität verschiedener Bodentypen. *Z. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde* **140**, 329-350.
- EDEN, M., P. SCHJØNNING, L.W. DE JONGE, P. MOLDRUP, 2009: Effects of mechanical impact on soil pore characteristics in soils with different organic matter content. *ISTRO 18<sup>th</sup> Triennial Conference Proceedings*, June 15-19, Izmir-TURKEY, T4-012, 1-7.
- EHRMANN, O., 1995: Regenwürmer und Regenwurmröhren bei Änderung der landwirtschaftlichen Nutzung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **76**, 581-584.
- EKENLER, M., M.A. TABATABAI, 2003: Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. *Biol. Fert. Soils* **39**, 51-61.

- GISI, U., R. SCHENKER, R. SCHULIN, F.X. STADELMANN, H. STICHER, 1997: Bodenökologie, 2. Aufl., Stuttgart, Georg Thieme Verlag.
- GRIGAL, D.F., W.E. BERGUSON, 1998: Soil carbon changes associated with short-rotation systems. *Biomass and Bioenergy* **14**, 371-377.
- HALL, R.L., S.J. ALLEN, 1997: Water use of poplar clones grown as short-rotation coppice at two sites in the United Kingdom. *Appl. Biol.* **49**, 163-172.
- HEYLAND, K.-U., 1996: Spezieller Pflanzenbau. Landwirtschaftliches Lehrbuch, 7. Aufl., Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer.
- HOFFMANN, G., M. DEDEKEN, 1965: Eine Methode zur kolorimetrischen Bestimmung der  $\beta$ -Glucosidaseaktivität im Boden. *Z. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde* **100**, 195-201.
- HOFMANN, B., J. BISCHOFF, J. RÜCKNAGEL, O. CHRISTEN, 2009: Einfluss langjähriger differenzierter Bearbeitungsintensität auf den C-Gehalt bindiger Standorte. Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. **21**, 125-126.
- HOFMANN-SCHIELLE, C., A. JUG, F. MAKESCHIN, K.E. REHFUESS, 1999: Short-rotation plantations of balsam poplar, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. I. Site-growth relationships. *Forest Ecology and Management* **121**, 41-55.
- JOSCHKO, M., J. BRUNOTTE, 2005: Regenwürmer und Co. – Was wissen wir über das Bodenleben? In: FRANGENBERG, A. (Hrsg.): Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit – Stand des Wissens und zukünftige Herausforderungen. Schriftenreihe des Instituts für Landwirtschaft und Umwelt **10**, 65-76.
- JUG, A., C. HOFMANN-SCHIELLE, F. MAKESCHIN, K.E. REHFUESS, 1999: Short-rotation plantations of balsam poplar, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. III. Soil ecological effects. *Forest Ecology and Management* **121**, 85-99.
- KAHLE, P., B. BOELCKE, 2004: Auswirkung des Anbaus schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb auf ausgewählte Bodeneigenschaften. In: Energieholzproduktion in der Landwirtschaft – Potenzial, Anbau, Technologie, Ökonomie und Ökologie. Bornimer Agrartechn. Ber. Heft 35, 99-108.
- KAHLE, P., E. HILDEBRAND, C. BAUM, B. BOELCKE, 2007: Long-term effects of short rotation forestry with willows and poplar on soil properties. *Archives of Agronomy and Soil Science* **53** (6), 673-682.
- KANDELER, E., K. BÖHM, E. MURER, 1995: Bodenmikrobiologische Prozesse als frühzeitige Indikatoren für die Änderung der Bodennutzung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **76**, 637-640.
- KÖRSCHENS, M., A. PFEFFERKORN, 1998: Der Statische Düngungsversuch und andere Feldversuche – Bad Lauchstädt. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH.
- KÖRSCHENS, M., E. SCHULZ, 1999: Die organische Bodensubstanz. Dynamik – Reproduktion – Ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. *UFZ-Bericht* **13**, 1-4.
- LAUREYSENS, I., J. BOGAERT, R. BLUST, R. CEULEMANS, 2004: Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management* **187** (2-3), 295-309.
- LEBERT, M., J. BRUNOTTE, C. SOMMER, H. BÖKEN, 2006: Bodengefüge gegen Verdichtungen schützen – Lösungsansätze für den Schutz landwirtschaftlich genutzter Böden. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **169**, 633-641.
- LEDIN, S., 1996: Willow wood properties and economy. *Biomass and Bioenergy* **11** (2-3), 75-83.
- LIEBHARD, P., 2007: Energieholz im Kurzumtrieb-Rohstoffe der Zukunft. Graz, Leopold Stocker Verlag.
- LIEBIG, M.A., J.W. DORAN, 1999: Impact of organic production practices and soil quality indicators. *Environ. Qual.* **28**, 1601-1609.
- MAKESCHIN, F., 1994: Effects of energy forestry on soils. *Biomass and Bioenergy* **6**, 63-79.
- MONREAL, C.M., H. DINEL, M. SCHNITZER, D.S. GAMBLE, V.O. BIEDERBECK, 1997: Impact of Carbon Sequestration on Functional Indicators of Soil Quality as Influenced by Management in Sustainable Agriculture. In: LAL, R., J.M. KIMBLE, R.F. FOLLETT, B.A. STEWART (eds.): Soil processes and the carbon cycle. CRC Press Boca Raton, 435-457.
- PAUL, R., 2002: Ergebnisse der Bodengefügeuntersuchungen auf den Thüringer Dauerbeobachtungsflächen. *Boden-Dauerbeobachtung in Deutschland*. UBA-Texte 66/02. 127-131.
- PERRY, C.H., R.C. MILLER, K.N. BROOKS, 2001: Impacts of short-rotation hybrid poplar plantations on regional water yield. *Forest Ecology and Management* **143**, 143-151.
- PETELKAU, H., 1987: Durch Fahrwerke landwirtschaftlicher Mechanisierungsmittel verursachte Schadwirkungen und Vorschläge zu ihrer Verminderung. In: ERMICH, D. (Hrsg.): Beiträge zur rationellen und strukturschonenden Bodenbearbeitung, 106-119. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Wissenschaftliche Beiträge 1987/11.
- POWLSON, D.S., P.C. BROOKES, B.T. CHRISTENSEN, 1987: Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic-matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry* **19**, 159-164.
- RASMUSSEN, K.J., 1999: Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil Tillage Res.* **53**, 3-14.
- REEG, T., A. BEMMANN, W. KONOLD, D. MURACH, H. SPIECKER (Hrsg.), 2009: Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 57-70.
- REEVES, D.W., 1997: The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Research* **43**, 131-167.
- ROGASIK, J., U. FUNDER, E. SCHNUG, H. ROGASIK, M. KÖRSCHENS, 2005: Zentrale Stellung des Humus für die Bodenfruchtbarkeit. In: Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit. Tagungsband **10**, 51-64.
- RÖHRICHT, C., S. KIESEWALTER, A. GROSS-OPHOFF, 2002: Acker- und Pflanzenbauliche Untersuchungen zum Anbau ein- und mehrjähriger Energiepflanzen im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft Dresden **4**.
- RÜCKNAGEL, J., O. CHRISTEN, 2009: Use of the information system REPRO to assess physical aspects of soil fertility. ISTRO 18<sup>th</sup> Triennial Conference Proceedings, June 15-19, Izmir-TURKEY, T1-031, 1-5.
- SAS Institut Inc., 1999: SAS 8.02. Cary, NC, USA.
- SANCHEZ, F.G., M. COLEMAN, Ch.T. GARTEN, R.J. LUXMOORE, J.A. STANTURF, C. TRETIN, S.D. WULLSCHLEGER, 2007: Soil carbon, after 3 years, under short-rotation woody crops grown under varying nutrient and water availability. *Biomass and Bioenergy* **31**, 793-801.
- SAUERBECK, D., 1992: Funktion und Bedeutung der organischen Substanz für die Bodenfruchtbarkeit – ein Überblick. *Berichte über Landwirtschaft*, **206**. Sonderheft: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, **4**, 13-29.
- SCHAAF, T., 1998: Integration von Modellansätzen zur Bodenbearbeitung und Düngung in den Baukasten für Stickstoffsimulationsmodell EXPERT-N. Band 10. Schriftenreihe der Zentralstelle für Agrardokumentation und -information, Bonn.
- SCHINNER, F., R. ÖHLINGER, E. KANDELER, R. MARGESIN, 1993: Bodenbiologische Arbeitsmethoden. Berlin, Springer-Verlag.
- SCHINNER, F., R. SONNLEITNER, 1996: Bodenökologie-Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Bd. 2, Bodenbewirtschaftung, Düngung und Rekultivierung. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag.
- SCHMITT, A.-K., S. ULRICH, S. TISCHER, B. HOFMANN, O. CHRISTEN, 2006: Beeinflussung bodenphysikalischer Eigenschaften durch den Anbau von Pflanzen zur Energiegewinnung. In: Kreislaufwirtschaft mit der Landwirtschaft – quo vadis? VDLUFA, 295-298.
- SIMS, W., B.M. GERARD, 1985: Earthworms- keys and notes for the identification and study of the species. London, Brill & Backhuys.
- SHANNON, C.E., 1948: The mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* **27**, 379-423.
- SPARLING, G.P., 1997: Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. In: Pankhurst C Doube BM and VVSR Gupta: Biological indicators of soil health. Wallingford, CAB International, 97-119.
- STETTER, U., F. MAKESCHIN, 1999: Humushaushalt ehemals landwirtschaftlich genutzter Böden nach Aufforstung mit schnellwachsenden Baumarten. In: HOFMANN, M. (Hrsg.): Modellvorhaben „Schnellwachsende Baumarten.“ – Zusammenfassender Abschlussbericht **13**, 341-367.
- TEBBE, C.C., T.-H. ANDERSON, O. LARINK, S. SCHRADER, 2002: Biologische Wechselwirkung – Wie wichtig ist die Vielfalt für die Funktion von Böden? Schriftenreihe des BMVEL **494**, 160-165.
- TISCHER, S., 2000: Veränderungen der mikrobiologischen Aktivität nach Bewirtschaftungswechsel. In: HÜLSBERGEN, K.-J., W. DIEPENBROCK (ed.): Die Entwicklung von Fauna, Flora und Boden nach Umstellung auf ökologischen Landbau – Untersuchungen auf einem mitteldeutschen Trockenlößstandort. UZU-Schriftenreihe. 101-107.
- TISCHER, S., 2005: Lumbricidenvorkommen in unterschiedlichen Ökosystemen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **107**, 209-210.
- TISCHER, S., A.-K. SCHMITT, B. HOFMANN, H. TANNEBERG, O. CHRISTEN, 2006: Auswirkungen des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen auf bodenbiologische Aktivitäten auf einer Löß-Schwarzerde im Mitteldeutschen Trockengebiet. In: Kreislaufwirtschaft mit der Landwirtschaft – quo vadis? VDLUFA, 481-489.
- TISCHER, S., 2008: Lumbricidae communities in soil monitoring sites differently managed and polluted with heavy metals. *Polish Journal of Ecology* **56** (4), 635-646.
- ULRICH, S., 2008: Zum Indikatorwert ausgewählter physikalischer Parameter und Kenngrößen des Kohlenstoffhaushaltes im Boden unter Berücksichtigung von Daten aus langjährige Bodenbearbeitungs- und Dauerdüngerversuchen. Tönning, Lübeck, Marburg, Der Andere Verlag.
- VERWILST, T., F. MAKESCHIN, 1996: Environmental aspects of biomass production and routes of European energy supply. Concerted action AIR 3-94-2466, Report from the working group on chemical soil and water issues.